

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA LUMINOSA Y ENERGETICA DE INSTALACIONES DE ALUMBRADO URBANO DE BAJO COSTO

Cabello, Alberto J. – Kirschbaum, Carlos F.

Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión “H.C.Bühler”, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800; C.P.4000 – San Miguel de Tucumán.
acabello@herrera.unt.edu.ar - ckirschbaum@arnet.com.ar

Resumen

Se efectúa un análisis del sistema de alumbrado adoptado por la Municipalidad de San Miguel de Tucumán para proveer del servicio de Alumbrado Público a vastos sectores de la periferia de la ciudad con el objeto de cubrir rápidamente la demanda del servicio empleando elementos de bajo costo inicial. Se establecen propuestas de mejoras de este sistema de alumbrado en lo que respecta al desempeño lumínico y energético logrando reducir en un 33% el consumo con una mínima inversión para la reconversión y/o futuros montajes.

Se analiza además la factibilidad del servicio de alumbrado utilizando pantallas enlozadas abiertas con enrejado antivandálico y lámparas del tipo Fluorescente compactas, lo cual lleva a desarrollar un método de análisis de la eficiencia energética de una instalación de alumbrado público en base a parámetros establecidos en la Norma IRAM-AADL J2022-1 y que nos permite comparar distintas instalaciones de alumbrado público considerando el desempeño de las mismas desde el punto de vista del consumo de energía.

1.- Introducción

En San Miguel de Tucumán, ante la elevada presión de los vecinos de barrios periféricos reclamando por la falta de servicio de alumbrado público, el Departamento de Obras Públicas de la Municipalidad ha optado por brindar el servicio a la mayor cantidad de zonas posibles con equipos de bajo costo inicial de instalación. Los mismos consisten en una luminaria tipo pera, con un cuerpo de fundición de Aluminio, pintado de color blanco esmaltado, conteniendo el portalámparas y con cubierta de policarbonato (en adelante LUMINARIA A), montado sobre un soporte pescante de acero galvanizado de 2.5 m, con lámpara de vapor de Sodio de Alta Presión Tubular Clara de 150W, como se muestra en las Figuras 1 y 2.



Figura 1.- Instalación de Alumbrado residencial de bajo costo con Luminaria A

La ventaja de este tipo de equipamiento es la posibilidad de montaje en columnas preexistentes del tendido de alimentación de la red eléctrica domiciliaria o en postes de madera de servicios de teléfono y/o video cable, separadas entre 25 a 30 m, a 6 o 7 m de altura de lo cual resulta una distribución unilateral de 5 luminarias por cada cuadra de 120 m.

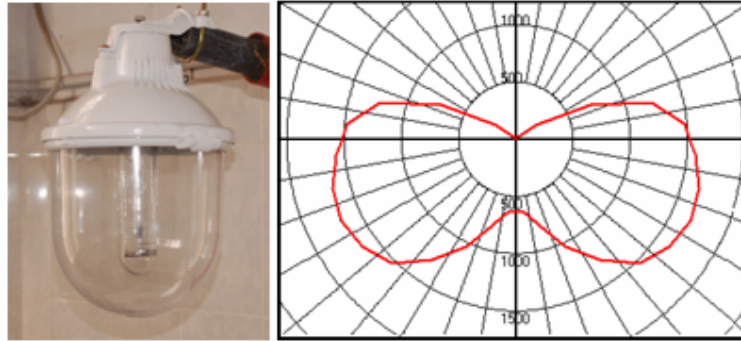


Figura 2.- Características de la Luminaria A

A continuación se presenta una evaluación fotométrica de una de estas instalaciones.

Tabla 1.- Características geométricas y relevamiento fotométrico:

CALLE: Diego de Villarroel al 1100 - BOP					
GEOMETRÍA: Unilateral					
LUMINARIA: Tipo A		ALTURA: 6 m	INCLINACIÓN: 5 °	PENETRACIÓN: 2 m	
LAMPARA: SAP-T 150W					

Diagram showing a 30 m wide area with a grid of 30 points (E1-E30) and a width of 9,1 m. The grid is 5 rows by 6 columns. Two luminaires are shown at the top corners of the grid.

VALORES MEDIDOS [LUX]:					
E1= 14,1	E6= 14	E11= 10,1	E16= 7,2	E21= 4,9	E26= 5,2
E2= 9,7	E7= 13,9	E12= 11	E17= 7,3	E22= 5,7	E27= 5,2
E3= 10,6	E8= 11,5	E13= 10	E18= 7	E23= 5,5	E28= 4,9
E4= 10,3	E9= 10	E14= 8,3	E19= 6,2	E24= 5,3	E29= 4,9
E5= 8	E10= 8	E15= 7	E20= 5,5	E25= 4,6	E30= 4,7

$\bar{E}_h = 8.02$	$G1 = E_{min}/E_{med} = 0,57$
	$G2 = E_{min}/E_{max} = 0,33$

La instalación típica consta de 5 luminarias por cuadra, totalizando 900W la potencia instalada por cuadra (180W por cada punto de luz).

La principal desventaja de esta instalación es la emisión de flujo luminoso por encima del plano horizontal de la luminaria, iluminando zonas que no son de utilidad en alumbrado residencial y que producen molestias por causa de luz intrusa a los vecinos, iluminando en exceso fachadas e introduciéndose en los domicilios. El nivel de iluminancia horizontal sobre calzada es bajo, por debajo del límite especificado para instalación Clase F según Norma IRAM_AADL 2022-2^[3], aunque las uniformidades son muy buenas, duplicando los límites de la Norma.

2.-Reconversión exitosa de este modelo de instalación

En una experiencia piloto efectuada en 2006 en un barrio residencial de la ciudad^[1], se buscó mejorar el desempeño de la instalación de alumbrado, utilizando la misma luminaria, pero con pantalla para redirigir el flujo luminoso hacia planos de utilidad como calle y veredas (LUMINARIA B).

Mediante el reemplazo de la geometría de distribución de las luminarias, de unilateral por tresbolillo, y con la reducción de la altura libre de 6 a 5 m, se logró no sólo reducir la potencia instalada por luminaria de 150W a 100W, sino casi duplicar el nivel promedio de iluminancia en calle y veredas, además de una notable mejora en las uniformidades, reduciendo significativamente la proyección de sombras oscuras en veredas debidas al arbolado presente.



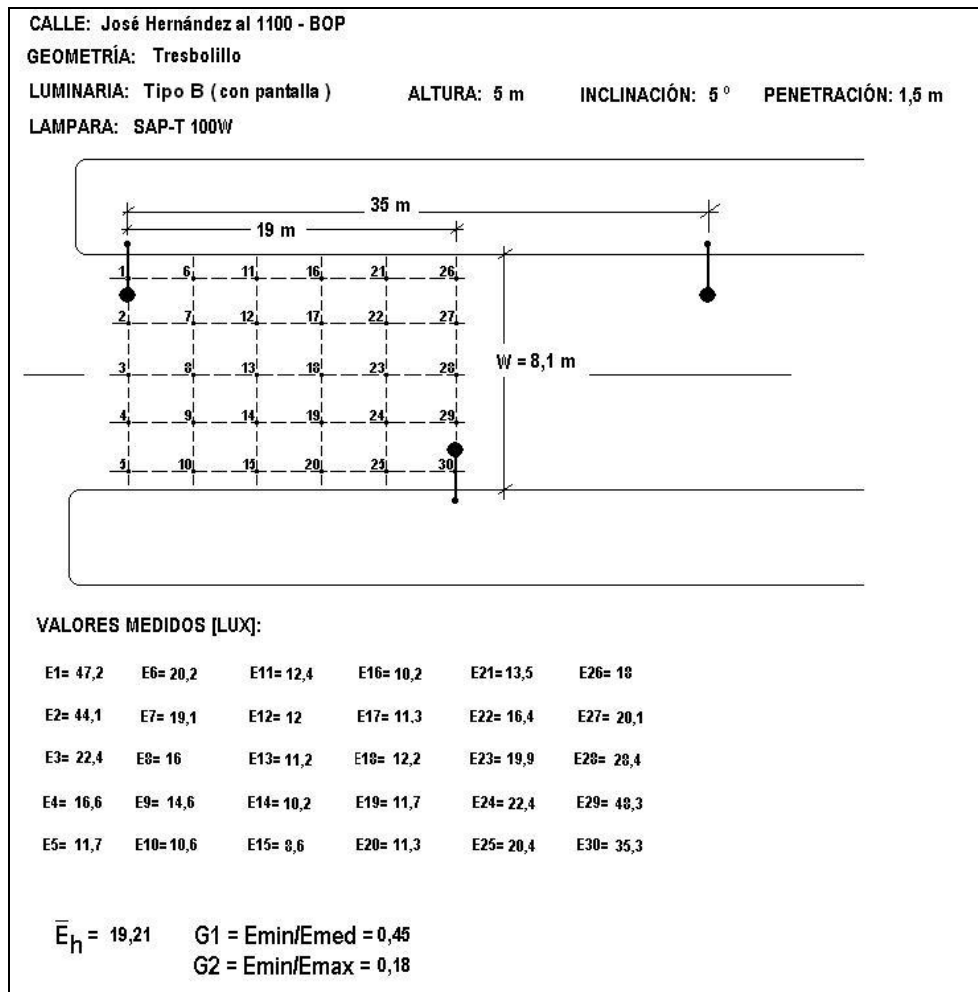
Figura 3.- Instalación de Alumbrado Público con Luminaria B (Enero del 2006)

Son necesarias 6 luminarias por cuadra en esta nueva configuración, totalizando 720W la potencia instalada por cuadra (120W por punto de luz), logrando un ahorro en el consumo del 20%. Además de esta ventaja de la nueva instalación respecto de la anterior, se duplican los niveles de iluminancias, aunque se reducen en un 15% las uniformidades, pero por encima de los límites fijados por Norma. En este tipo de instalación se incrementan los costos iniciales de montaje debido a la Geometría Tresbolillo, que obliga a montar en la vereda opuesta columnas adicionales para lograr la alternancia de las luminarias.

Es importante destacar que esta instalación admite una reducción adicional de la potencia instalada verificando los límites de la Clase F^[3], esto es, con lámparas de vapor de Sodio alta presión de 70W, obteniendo en este caso $E_{med} = 12,2 \text{ lux}$, $G1 = 0,38$ y $G2 = 0,18$; llegando el ahorro en el consumo a un 44% respecto del primer caso^[1]. El municipio ha descartado esta

opción por inconvenientes en la logística de provisión de stock de lámparas y equipos de esta potencia.

Tabla 2.- Características geométricas y relevamiento fotométrico:



3.- Propuesta de reconversión más económica para el resto de las instalaciones

Con el objeto de mantener la premisa del bajo costo inicial de la instalación aprovechando la infraestructura de montaje existente, se sugiere un cambio de política de mínimo costo en la elección del tipo de luminaria, consistente en la elección del mismo tipo de luminaria pero con pantalla incorporada, con lámpara de Sodio Alta Presión Tubular de 100W, lo cual arroja resultados positivos en cuanto a la mejora de los parámetros luminotécnicos y en la reducción del consumo, según el siguiente ejemplo de cálculo:

Tabla 3.- Valores calculados instalación propuesta

Geometría: Unilateral
Ancho Calzada: 9 m
Altura libre luminaria: 6m.
Largo Brazo Pescante sobre Calzada: 2.5m
Inclinación Pescante: 5°
Separación entre columnas: 30 m

	Cálculo	Unidad	Media	Mín/Med	Mín/Máx
1	Calzada	lux	12,4	0,24	0,04
2	vereda izqu.	lux	10,9	0,29	0,11
3	vereda der	lux	4,91	0,45	0,19
4	fachada izqu.	lux	10,9	0,26	0,11
5	fachada der.	lux	6,86	0,57	0,39

En este caso la potencia instalada se reduce de 900W a 600W, con un ahorro del 33% en el consumo, el nivel de iluminancia supera en un 25% el limite fijado por Norma ^[3], pero las uniformidades no cumplen, en especial G2. Este resultado se explica porque la luminaria B posee un anillo reflector de Aluminio circundando el portalámpara, con un facetado cuyo comportamiento óptico es equivalente a un lente de Fresnel, que produce una zona de luminancias muy intensas en la calzada inmediatamente por debajo de la luminaria, provocando zonas de intenso brillo que contrastan con el resto de la calzada, dificultando la obtención de buenas uniformidades. En la Figura 4 se muestran los componentes de la luminaria, donde el reflector de referencia se ubica en el centro de la fotografía.



Figura 4.- Características constructivas de la Luminaria B

Si se suprime este reflector de la luminaria, se elimina la concentración de intensidades luminosas en las proximidades del nadir, obteniéndose la distribución de intensidades que se indica en la Figura 5.

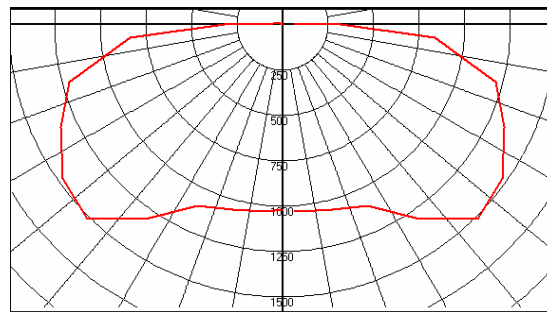


Figura 5.- Distribución de intensidades luminosas en [cd] de la Luminaria B con pantalla, SIN reflector:

En lo que sigue se presentan los cálculos que verifican esta suposición, en la misma instalación considerada:

Tabla 4.- Valores calculados. Luminaria B sin reflector

	Cálculo	Unidad	Media	Mín/Med	Mín/Máx
1	Calzada	lux	12.4	0.26	0.10
2	vereda izqu.	lux	11.8	0.28	0.12
3	vereda der	lux	5.37	0.44	0.19
4	fachada izqu.	lux	11.8	0.25	0.10
5	fachada der.	lux	7.39	0.56	0.38

Vemos que se ha producido un significativo aumento de la uniformidad G2(Mín/Máx.), cercano al límite establecido para Clase F en la Norma^[3], superándolo en los casos en que la separación entre columnas sea inferior a los 30 m, lo cual es lo más frecuente en este tipo de instalaciones urbanas.

Es importante destacar la mejora, con la modificación sugerida, de parámetros luminotécnicos no contemplados en la norma, como los niveles de iluminancia en veredas y fachadas y sus correspondientes uniformidades. Además la utilización del artefacto sin el espejo posibilita reducir el costo del mismo.

Existe en el mercado local una luminaria de similares características ofrecida por otro fabricante, que consiste en un cuerpo de aluminio con pantalla integrada (no desmontable), cobertura de policarbonato y un reflector de aluminio pulido convexo (LUMINARIA C), con la siguiente distribución de intensidades para SAP-E 100W:

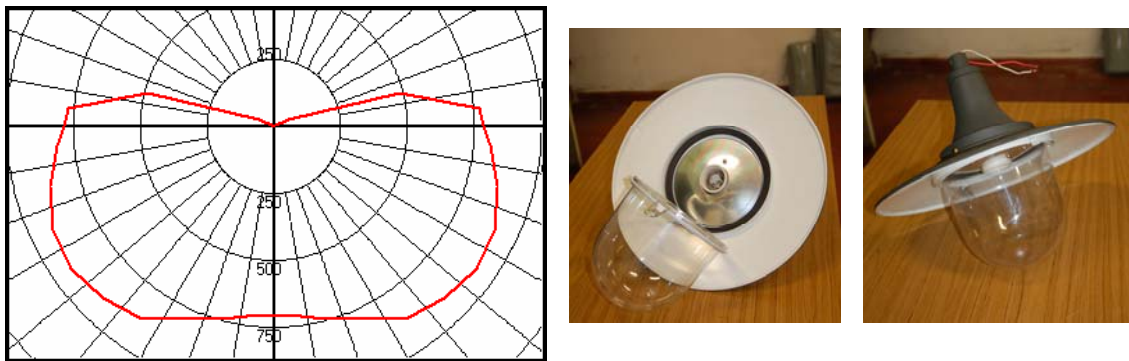


Figura 6.- características de la Luminaria C

Si calculamos la misma instalación de referencia con esta luminaria y lámpara SAP_E 100W, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 5.- Valores calculados. Luminaria C

	Cálculo	Unidad	Media	Mín/Med	Mín/Máx
1	Calzada	lux	10.9	0.27	0.10
2	vereda izqu.	lux	10.1	0.31	0.12
3	vereda der	lux	4.58	0.48	0.21
4	fachada izqu.	lux	10.7	0.30	0.12
5	fachada der.	lux	6.86	0.60	0.40

Como se puede apreciar, se obtiene casi el mismo desempeño que con la luminaria anterior sin anillo reflector, pero su utilización implicaría un mayor costo en la instalación ya que la Luminaria C se ofrece a un precio superior que la luminaria B.

4.- Análisis de alternativas de costo aún mas bajo

Otra posibilidad de alternativas de bajo costo en alumbrado residencial, consiste en la utilización de portalámparas con pantalla metálica enlozada, del tipo MN22 (LUMINARIA D), ampliamente utilizada antaño con lámparas incandescentes de 200W, reemplazadas luego por mezcladoras de 160W, lo que consistió en la primera reconversión del Alumbrado Público en la década de los 60, lográndose incrementar un 50% el flujo con una reducción del 20% en el consumo.

La idea es evaluar el desempeño de estas luminarias con lámparas del tipo fluorescentes compactas (LFC), equivalente en flujo a una mezcladora de 160W. Debido a que se trata de una luminaria abierta, sin ningún tipo de protección antivandálica de la lámpara, se considera a esta luminaria con una protección tipo malla de alambre o enrejado, lo que produce una leve reducción en su rendimiento.

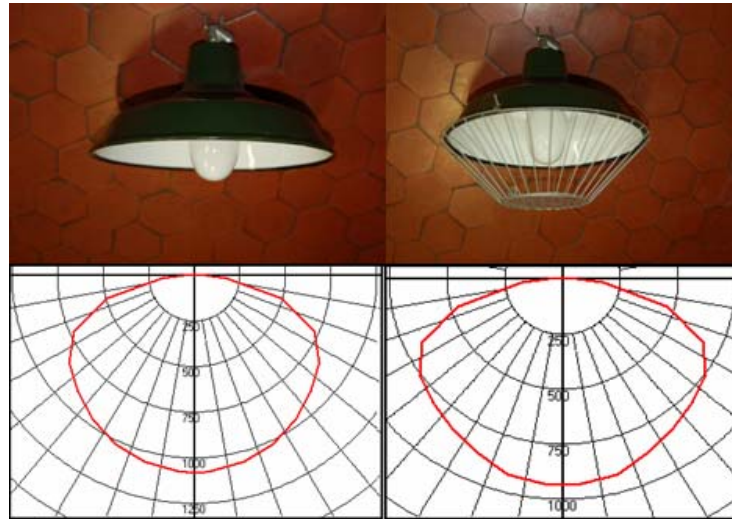


Figura 7.- Luminaria D con y sin reja de protección. Lámpara Hg cc 125W

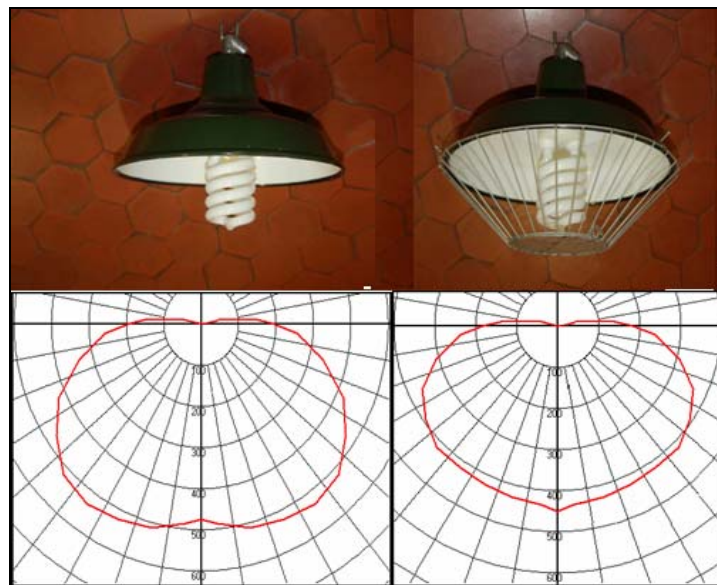


Figura 8.- Luminaria D con LFC 60W

5.- Consideraciones Generales sobre el Ahorro de Energía en Alumbrado Público

Para alcanzar un Alumbrado Público eficiente, se deben adoptar las siguientes medidas técnicas en la etapa de diseño:

- a) elegir luminarias de alto rendimiento ($\eta > 75\%$) con distribución longitudinal Media o Larga, Distribución Transversal Media o Ancha, y una clasificación Semi-Apantallada, lo que asegura instalar menor cantidad de luminarias por km.
- b) utilizar lámparas de descarga de alta eficacia en [lm/W], larga vida útil (por ejemplo lámparas de Sodio Alta Presión en lugar de Mercurio), lo cual, en combinación con lo anterior, también resultará en una menor distancia entre luminarias consecutivas.
- c) especificar para las lámparas equipos auxiliares de bajas pérdidas.

Estas medidas nos permiten obtener un diseño eficaz del sistema del alumbrado de autopistas, avenidas y calles que cumplan con los criterios de seguridad vial con un menor consumo energético.

5.1.-Clasificación de Luminarias de A°P° según la distribución de intensidades

La norma IRAM AADL J2022-1 [2] clasifica las luminarias, en base a cómo distribuyen el flujo luminoso sobre la calzada:

- a) en sentido longitudinal a la calzada (corta, media, larga)
- b) en sentido transversal a la calzada (angosta, media, ancha)
- c) según el control del apantallamiento (apantallada, semi-apantallada, no apantallada.)

Tablas 6 y 7.- Distribuciones en sentido longitudinal y transversal a la calzada

	Distribución Longitudinal			Distribución Transversal		
	CORTA	MEDIA	LARGA	ANGOSTA	MEDIA	ANCHA
Alcance Longitudinal	L/H < 1,73	1,73 < L/H < 2,75	L/H > 2,75	A/H < 1,0	1,0 < A/H < 1,43	A/H > 1,43
Angulo de Elevación	$\gamma_{HAZ} < 60^\circ$	$60^\circ < \gamma_{HAZ} < 70^\circ$	$\gamma_{HAZ} > 70^\circ$	$\gamma_T < 45^\circ$	$45^\circ < \gamma_T < 55^\circ$	$\gamma_T > 55^\circ$

$\gamma_{HAZ} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$

Tabla 8.- Clasificación según el control de Apantallamiento

CLASIFICACION DE LUMINARIAS SEGUN SU DISTRIBUCION LUMINOSA (*)	Intensidad luminosa máxima bajo un ángulo de:	
	$\gamma = 90^\circ$	$\gamma = 80^\circ$
Apantallada	$\leq 20 \text{ cd}/1000 \text{ lm}$ (hasta un valor absoluto máx. de 1000cd)	$\leq 60 \text{ cd}/1000 \text{ lm}$
Semi apantallada	$\leq 50 \text{ cd}/1000 \text{ lm}$ (hasta un valor absoluto máx. de 1500 cd)	$< 150 \text{ cd}/1000 \text{ lm}$
No apantallada	$\leq 1500 \text{ cd}$ (*)	-

6.- Metodología de comparación y análisis de resultados.

Efectuando una evaluación de las Luminarias A, B, C y D en base a los parámetros especificados en esta clasificación según tipo de distribución de intensidades y control del apantallamiento (ver §5.1), se busca comparar aquellos parámetros de interés que intervienen en estos casos y que pueden indicarnos cuál de estas luminarias es más adecuada en términos de eficiencia luminosa y energética, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9.-Comparación de luminarias en base a rendimientos, tipos de distribución y apantallamiento

	Luminaria A SAP-T 150W	Luminaria B c/reflector		Luminaria B s/reflector		Luminaria C c/reflector		Hg 125W		LFC 60W		
		SAP-T 100W	SAP-E 100W	SAP-T 100W	SAP-E 100W	SAP-T 100W	SAP-E 100W	Luminaria D	Luminaria D c/reja	Luminaria B	Luminaria D	Luminaria D c/reja
γ_{HAZ} [°]	65	5	5	45	55	65	55	5	15	35	35	10
Distribuc. Longitud.	Media	Corta	Corta	Corta	Corta	Media	Corta	Corta	Corta	Corta	Corta	Corta
$I_{y_{80}}$ [cd/klm]	1572	106,4	107,2	110,1	107,8	116,4	124,1	60,3	57,7	82,1	95,8	88
$I_{y_{90}}$ [cd/klm]	1518,5	40,4	39,7	34,5	40,1	113,8	115,7	10,8	11,7	68,2	62,6	58,4
Grado Apantall.	No Apant.	Semi Apant	Semi Apant	Semi Apant	Semi Apant	No Apant.	No Apant	Apant	Apant	No Apant	No Apant	No Apant
η_T [%]	82,4	79,8	91,7	83,5	92,5	89,8	93,4	78,7	70,8	73,9	91,6	78,6
$\eta_{inf.}$ [%]	58,3	77,7	88,9	81,6	89,6	69,4	73,3	78,3	70,2	65,4	84,6	71,6
$\eta_{sup.}$ [%]	24,1	2,0	2,9	1,9	2,9	20,4	20,1	0,4	0,6	8,5	7	7

Como premisas del análisis comparativo, establecemos que una luminaria eficiente, además de poseer un $\eta_T > 75\%$, debe verificar que su rendimiento en el hemisferio superior sea lo menor posible, preferentemente $< 5\%$ para evitar el derroche de flujo luminoso^[4] y molestias a vecinos con ventanas en pisos superiores^[5]; además de verificar *distribución longitudinal* MEDIA o LARGA, y clasificación SEMI-APANTALLADA, lo cual permitirá un menor número de luminarias por kilómetro (mayor separación entre columnas). Respecto de la distribución longitudinal, si bien las luminarias analizadas corresponden a la categoría CORTA, es importante buscar aquella cuyo γ_{HAZ} sea el mayor posible, ya que esto nos asegura que la luz se va a distribuir en sentido longitudinal con un mayor alcance.

Según lo precedente, observamos que la Luminaria B *sin* anillo reflector y con SAP-E 100W es la más adecuada en los términos de eficiencia mencionados precedentemente para la iluminación de zonas residenciales. Cabe aclarar que la diferencia de costo de la Luminaria B respecto de la Luminaria A es del orden del 10% mayor, lo cual se justifica con las ventajas citadas precedentemente.

Es interesante destacar que en el caso de la luminaria D, la inserción de la reja protectora disminuye el rendimiento en un 8% en el caso de estar equipada con lámpara de Mercurio Hg

125W, mientras que en la misma luminaria con FLC 60W, la presencia de reja disminuye el rendimiento en un 13%. Esta luminaria, al tener un reducido alcance longitudinal y un elevado grado de apantallamiento no sería apta para el alumbrado de calles, pero sí resultaría interesante su aplicación como alumbrado complementario para veredas, en el caso de equiparla con lámparas LFC, pues en este caso el grado de apantallamiento se reduce significativamente.

7.- Conclusiones y recomendaciones.

Estos resultados permiten tomar decisiones acertadas a los responsables de la planificación del alumbrado urbano, a la hora de establecer planes de reconversión de instalaciones con propósitos de mejorar la eficiencia energética, como por ejemplo convertir todas las Luminarias A en Luminarias B simplemente agregando una pantalla y quitando un anillo reflector, además del reemplazo de lámparas de sodio alta presión de 150W por sus equivalentes de 100W al momento de efectuar tareas de mantenimiento programado.

Como resultado adicional de este análisis, se propone una metodología de análisis de eficiencia energética de instalaciones de alumbrado residencial tomando en cuenta parámetros de luminarias tales como *rendimientos* en planos inferior y superior, *ángulo γ_{HAZ}* (distribución longitudinal) y *grado de apantallamiento*, que permiten una visión global del grado de adecuación de una luminaria en términos de eficiencia. Estos comentarios son el punto de partida para la introducción de las luminarias de alumbrado público en el sistema de etiquetado de eficiencia energética actualmente vigente para lámparas de uso general, respecto de lo cual en el Primer Simposio sobre uso racional de Energía en Iluminación, realizado el 30 de Mayo de 2008 en San Miguel de Tucumán, se propuso extender el Programa de Etiquetado a todos los productos que consumen energía, incluidas luminarias, al conjunto luminaria-lámpara, equipos auxiliares, de control, etc.^[6]

8.- Bibliografía

- [1] Kirschbaum C., Cabello A., Tonello G., Pesa A., Sandoval J., Raitelli M., *Residential Areas Lighting: Demands and proposals for crisis times*, trabajo presentado en *The 26th Session of the CIE*, Beijing, China, Julio 2007
- [2] IRAM-AADL. Norma J2022-1 “Alumbrado Público. Luminarias. Clasificación Fotométrica”. ICS 29.140.40. CNA 6210. Buenos Aires, Agosto 1996
- [3] IRAM-AADL. Norma J2022-2 “Alumbrado Público. Vías de Tránsito. Clasificación y niveles de iluminación”. ICS 91.160.20. CNA 6210. Buenos Aires, Septiembre 1995.
- [4] Manzano E., Cabello A., *Evaluación de la Polución Lumínica Urbana*. Revista Luminotecnia, Nº 79, pp. 118-124, ed. AADL, Buenos Aires, Septiembre 2005.
- [5] Cabello A, Kirschbaum C., “Lighting Pollution And Intrusive Light Evaluation In Residential And rural Areas”, pp.39-48. Actas Conferencia Internacional STARLIGHT 2007, isla de La Palma, España, Abril de 2007.
- [6] Kirschbaum C., Colombo E. “Uso Racional y Eficiente de la Energía en Iluminación”. *Primer Simposio de Iluminación eficiente en la Argentina*, 1ª ed. Editado por EDUNT, 2008, ISBN 978-987-1366-27-9. Tucumán, Noviembre 2008.

9.-Reconocimientos.

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación N°26/E430 “Eficiencia y sostenibilidad en la iluminación de recintos urbanos”, financiado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán; como así también del Proyecto de investigación PICTO n°870/2004 “Tecnologías para el hábitat, el aprovechamiento energético y el desarrollo productivo en áreas rurales de Tucumán”, financiado por ANPCYT-UNT.